

DOI: 10.7672/sgjs2024130093

桩端后注浆 PHC 管桩原理及工程应用

胡玉银¹, 陈建兰²

(1. 上海同人里岩土工程技术有限公司, 上海 200122; 2. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200122)

[摘要] PHC 管桩具有承载力高、施工速度快、施工质量好和工程造价低的优点, 因此在工程建设中得到广泛应用。但是受制于地基承载力, PHC 管桩的桩身强度往往得不到充分发挥, 造成资源浪费。桩端后注浆是提高地基承载力非常有效的方法。首先, 利用 PHC 管桩空腔设置注浆管, 在桩端安装具有注浆功能的桩尖, 在 PHC 管桩中形成注浆回路; 然后, 将 PHC 管桩沉桩到位; 最后, 通过注浆回路向 PHC 管桩桩端压注高压水泥浆, 加固桩端和桩侧土体, 达到提高地基承载力和桩基承载力的目的。为了实现 PHC 管桩桩端后注浆, 开发了注浆器内置式注浆桩尖。试验研究和工程应用表明, 注浆器内置式注浆桩尖技术是可行的, 桩端后注浆 PHC 管桩具有工艺简单、设备简易、效果显著和成本低廉的优点。

[关键词] PHC 管桩; 注浆; 加固; 承载力

[中图分类号] TU753.3

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)13-0093-06

Mechanism and Application of Pile-end Post-grouting PHC Pipe Pile

HU Yuyin¹, CHEN Jianlan²

(1. Shanghai Tongrenli Geotechnical Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 200122, China;

2. Tongji University Architectural Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200122, China)

Abstract: PHC pipe pile has the advantages of high bearing capacity, fast construction speed, good construction quality and low project cost. Therefore, it is widely used in engineering construction. However, due to the bearing capacity of the foundation, the strength of the PHC pipe pile is often not fully utilized, resulting in a waste of resources. Pile-end post-grouting is a very effective method to improve the bearing capacity of the foundation. Firstly, the grouting pipe is set up by using the cavity of the PHC pipe pile, and the pile tip with grouting function is installed at the pile end to form a grouting loop in the PHC pipe pile. Then, the PHC pipe pile is piled in place. Finally, the high-pressure cement slurry is injected into the PHC pipe pile end through the grouting circuit to reinforce the soil at the pile end and the pile side to improve the bearing capacity of both the foundation soil and the pile foundation. To realize the post-grooming of the PHC pipe pile end, the built-in grouting pile tip of the grouting device is developed. The experimental research and engineering application show that the built-in grouting pile tip of the grouting device is technically feasible, and the post-grouting PHC pipe pile has the advantages of a simple process, simple equipment, remarkable effect and low cost.

Keywords: PHC pipe pile; grouting; reinforcement; bearing capacity

0 引言

PHC 管桩具有承载力高、施工速度快、施工质量好和工程造价低的优点, 因此在工程建设中得到广泛应用。但是受制于地基承载力, PHC 管桩的桩身强度往往得不到充分发挥, 造成资源浪费。

后注浆是提高地基承载力非常有效的方法, 因此许多工程技术人员借鉴钻孔灌注桩桩端后注浆技术, 积极探索 PHC 管桩桩端后注浆技术, 以便提高 PHC 管桩承载性能。PHC 管桩桩端后注浆技术研究主要围绕注浆桩尖开发进行。孔清华等^[1]开发了注浆器外露的注浆桩尖, 试验表明, 管桩桩端后注浆较普通管桩承载力提高 2.25 倍。宗可锋等^[2]介绍了桩端水平方向注浆施工技术。近年来,

[作者简介] 胡玉银, 教授级高级工程师, E-mail: 2143083834@qq.com

[收稿日期] 2023-08-22

还有许多工程技术人员致力于开发预制桩注浆技术^[3-11],但总体而言,PHC管桩后注浆技术研究还处于探索阶段,技术还不够成熟,许多注浆桩尖专利技术因为存在缺陷没有得到推广应用而放弃。

在深入研究现有 PHC 管桩注浆桩尖技术的基础上,开发了注浆器内置的注浆桩尖。试验研究和工程应用表明,桩端后注浆 PHC 管桩技术是可行的,具有工艺简单、设备简易、效果显著和成本低廉的优点,具有良好的推广应用前景。

1 注浆器内置的注浆桩尖

PHC 管桩桩端后注浆桩尖一方面要满足沉桩需要,沉桩过程中桩尖受力很大,因此注浆桩尖必须具有很强的承载能力,能够克服沉桩过程中遇到的坚硬土层,以及碎石、卵石等障碍物;另一方面要具有注浆、止回功能,PHC 管桩沉桩到位后,注浆器不被桩端土层束缚,能够顺利进行注浆,而且注浆完成后,注浆器能够自行关闭,避免水泥浆返流。

根据以上分析,开发了注浆器内置的注浆桩尖。注浆器内置的注浆桩尖与普通十字注浆相似,外形都为十字形。只是注浆器内置的注浆桩尖在桩尖中央设置了注浆器及其保护钢管,如图 1 所示。注浆器位于桩尖正中央,采用黑铁管制作。黑铁管开有注浆孔,采用硬橡胶管紧密保护。一方面防止沉桩过程中砂土进入注浆管,造成注浆管堵塞;另一方面在注浆终止后,利用硬橡胶管的弹性封闭注浆孔,防止水泥浆返流,起到水泥浆止回的作用。注浆器采用钢管保护,钢管一端与桩尖端板焊接,另一端采用圆形钢板焊接封闭,起到保护注浆器的作用。保护钢管内填碎石,阻止砂土进入保护罩,同时作为水泥浆渗出通道。保护钢管四周开有出浆孔,以便水泥浆渗出,进入桩端土层中。



图 1 注浆器内置的注浆桩尖

Fig. 1 The grouting pile tip embedded in the grouting device

工程试验和工程应用表明,开发的注浆器内置注浆桩尖具有结构紧凑、承载能力强、注浆可靠的特点,完全能够满足 PHC 管桩桩端后注浆施工需要。

2 PHC 管桩桩端后注浆工艺原理

PHC 管桩桩端后注浆工艺原理为:通过在 PHC 管桩中设置注浆管,在桩端安装具有注浆功能的桩尖,在 PHC 管桩中形成注浆回路。PHC 管桩沉桩到位后,通过注浆回路向 PHC 管桩桩端压注高压水泥浆,加固桩端和桩侧土体,达到提高地基承载力和桩基承载力的目的,如图 2 所示。

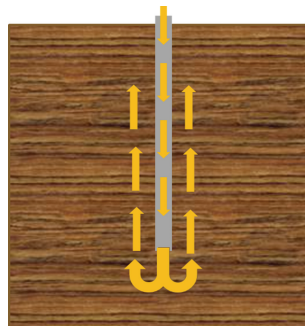


图 2 PHC 管桩桩端后注浆工艺原理

Fig. 2 Principle of post grouting technology for PHC pipe piles

桩端后注浆 PHC 管桩一般采用静压工艺沉桩。当地地质条件复杂和环境保护要求高时,也可以借助引孔植入和搅拌植入工艺,辅助静压沉桩。静压沉桩工艺适宜在以下场合应用:场地条件良好,不存在静压沉桩难以穿越的砂层、砾石、碎石等土层;场地周边无重要设施和建筑,环境保护要求比较宽松。

桩端后注浆 PHC 管桩静压沉桩施工工艺流程为:桩尖制作→桩尖与管桩焊接→静压沉桩→桩端注浆。

3 PHC 管桩桩端后注浆施工技术

桩端后注浆 PHC 管桩施工主要包括沉桩和后注浆两大部分。无论是静压沉桩,还是引孔植入和搅拌植入施工技术,都是成熟技术,在此不予赘述。重点介绍 PHC 管桩桩端后注浆施工技术。PHC 管桩桩端后注浆施工成功的关键在于,注浆管路通畅和不漏浆,需要重点关注以下环节:桩尖制作、注浆管安装、清水开塞、水泥浆制备和注浆。

3.1 桩尖制作

桩尖制作应保证钢板材质、规格和焊接满足设计要求,确保桩尖结实、牢固。注浆器与桩尖封板焊接前,应当先将橡胶套拆下,防止焊接高温损坏橡胶套。碎石回填至保护钢管五分之四即可,碎石保持松散状态,以便注浆器顺利开塞。

3.2 注浆管安装

注浆管选用普通黑铁管,通径为 25mm,壁厚为

2. 8mm。注浆管采用套筒连接,连接套筒壁厚为4mm,长度 $\geq 4\text{cm}$,注浆管螺纹长度 $\geq 2\text{cm}$ 。注浆管接头缠绕生胶带密封,防止注浆管漏浆。为防止在管桩吊运、沉桩过程中损坏注浆管,需要在管桩内设置支架固定注浆管。

3.3 清水开塞

为确保注浆成功,注浆前先进行清水开塞,检验注浆管路是否通畅和渗漏。清水开塞成功后,才能进行桩端注浆。清水开塞压力比较大,必须选用额定工作压力 20MPa 的高压注浆泵。清水开塞成功后,持续注水 2min 即可。但是对于持力层为强风化花岗岩、泥岩等遇水崩解、弱化土层的桩基,在工艺试验成功以后,可以不进行清水开塞,直接进行桩端注浆。

3.4 水泥浆制备

水泥采用普通硅酸盐水泥,水泥强度等级不应低于 42.5 级。水泥浆的水灰比取 0.55,对于渗透性强的砂土持力层,水灰比可以适当减小,但不应小于 0.45。首先按照设计要求的注浆体积和水灰比,通过计算确定单根桩注浆所需的水泥和水的用量;然后根据注浆总体安排和制浆机的容量,确定一次制浆所需水泥和水的用量;水泥和水准确称量后,投入制浆机中搅拌,搅拌时间不短于 3min;最后水泥浆经过 3mm \times 3mm 滤网过滤后储存于储浆桶中,防止水泥浆中有水泥颗粒堵塞注浆管和注浆器。

3.5 注浆

为确保注浆顺利进行,且在较短时间内完成,注浆泵必须具备两大性能:①较高的工作压力,额定工作压力必须大于 20MPa;②较大的理论排量,额定理论排量一般应当大于 50L/min,以便能够在 1h 内完成单根桩注浆。沉桩到达设计标高即可开始桩端后注浆。

对于群桩基础,为避免先期注浆影响后期施工管桩清水开塞和注浆,可以在沉桩到位先清水开塞,待一个区域桩基沉桩施工完成后统一注浆。注浆以注浆量控制为主,注浆压力控制为辅。如中途出现地面冒浆,应暂停注浆,待 15~20min 后,再次注浆,直至设计注浆量压注完成。

4 PHC 管桩桩端后注浆加固机理

4.1 注浆力学机理

桩端后注浆管桩桩端处于原状土层中,桩侧与原状土体紧密接触,有效约束水泥浆液,因此一般情况下,PHC 管桩桩端后注浆加固效果明显。管桩桩端后注浆力学机理如下。

1) 渗透为主,劈裂为辅。水泥浆液受到桩侧土

体约束,注浆能够维持较高压力,水泥浆以渗透土体的方式加固土体。只有当桩端周围土层渗透性差,水泥浆来不及扩散,注浆压力超过土体强度时,土体产生劈裂破坏,水泥浆以劈裂土体的方式加固土体。

2) 桩端为主,桩侧为辅。水泥浆自桩端注浆器出来后,首先渗入桩端下面土体。然后随着注浆压力加大,水泥浆一方面向桩端深部土体渗透,另一方面沿桩侧上返。因此在群桩基础中,由于桩端水泥浆水平方向渗透,群桩协同加固效应显著。

但是当桩侧土体强度不足时,上返水泥浆击穿桩侧土体,地面出现冒浆。在福州某项目 PHC 管桩桩端后注浆工程试验时,就出现了地面冒浆现象。试桩持力层为卵石,上覆土层为流塑淤泥和松散中砂。注浆量约 1.0m³ 时,地面出现冒浆。因此在桩端以上存在深厚淤泥时,PHC 管桩桩端后注浆施工应当特别注意。

4.2 后注浆加固机理

PHC 管桩桩端后注浆与钻孔灌注桩桩端后注浆加固机理不同,主要为化学加固,没有压密等物理加固。普通硅酸盐水泥中的硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙、硫酸钙等矿物,与水发生水解和水化反应,生成氧化钙、水化硅酸钙、水化铝酸钙、水化铁酸钙等。水泥浆的这些水化物充填砂土孔隙,增加了砂土颗粒之间的黏聚力,即增加砂土的强度和承载力。另外水泥浆沿桩侧上返时,PHC 管桩光滑的表面因水泥浆硬化而毛糙,增加了桩土之间相互作用力,也会提高桩基承载力。

5 PHC 管桩桩端后注浆承载力确定

PHC 管桩桩端后注浆对桩端和桩侧土层都有加固作用,但是要定量评价这种加固作用还比较困难。桩端后注浆 PHC 管桩承载力确定方法理论研究和工程经验还比较少,还没有成熟的方法可供工程直接使用。因此工程实践中,还是采用设计试桩的办法确定桩端后注浆 PHC 管桩的承载力。首先参照钻孔灌注桩桩端后注浆的工程经验,估算桩端后注浆 PHC 管桩的承载力,制定设计试桩方案;然后进行桩端后注浆 PHC 管桩试桩施工;试桩养护到位后,采用慢速维持荷载法的静载荷试验检测桩基极限承载力;最后通过专家论证,确定桩基承载力设计值(特征值)。

6 工程应用

6.1 应用概况

自开发 PHC 管桩桩端后注浆桩尖及工艺以来,桩端后注浆 PHC 管桩先后在广州亚运城 H2 地块、

桐乡璀璨荣里、福州世茂帝封江、珠海世茂港珠澳口岸城、太原旭辉·碧桂园商业综合体等 10 多个项目进行了工程试验,取得了圆满成功,验证了桩端后注浆 PHC 管桩技术的可行性和经济合理性。在广东肇庆、云南昆明和上海等地多个项目推广应用,产生了良好的经济效益,共计节约成本近 3 000 万元,如表 1 所示。本文以上海西岸金融城 F 地块项目为例,介绍 PHC 管桩桩端后注浆的工程应用情况。

表 1 应用案例

Table 1 Application cases

序号	工程名称	应用范围	桩基规格
1	昆明旭辉铂宸府	33 层主楼	PHC600
2	昆明世茂双凤 A9 地块	33 层主楼	PHC600
3	肇庆世茂广场	5 层主楼	PHC600
4	上海香港置地徐汇滨江西岸金融城 F 地块	18~24 层塔楼	PHC600

6.2 工程案例

6.2.1 工程概况

上海西岸金融城位于徐汇区东部黄浦江畔,占地面积 23 万 m^2 ,计容面积近 109 万 m^2 ,由 5 个街坊 28 个地块组成。其中 F 地块地下 2 层,包括 2 栋高约百米的塔楼:F03 为 18 层、91m 高的办公塔楼;F06 为 24 层、86m 高的公寓塔楼。

按沉积年代、成因类型及物理力学性质的差异,场地内地层自上而下主要分为 12 层,各土层的主要物理力学参数如表 2 所示。

表 2 土层的主要物理力学参数

Table 2 The main physical and mechanical parameters of soil layers

土层名称	天然重度/ ($kN \cdot m^{-3}$)	标准贯入 试验实测 平均值 N	固结快剪	
			黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
① ₁ 填土	—	—	—	—
① ₃ 黏质粉土	17.9	3.9	4.7	28.3
② ₁ 粉质黏土	19.3	—	23.5	16.1
③ 淤泥质粉质黏土	17.2	—	10.8	14.6
④ 淤泥质黏土	16.7	—	10.6	11.3
⑤ ₁ 粉质黏土	17.6	—	14.3	16.1
⑤ ₃₁ 粉质黏土	17.6	—	14.7	18.9
⑤ ₃₃ 粉质黏土	17.7	—	16.1	18.1
⑤ ₄ 粉质黏土	19.8	—	46.0	17.3
⑦ ₂₁ 粉砂夹粉质黏土	19.8	41.9	4.1	31.8
⑦ ₂₂ 粉砂	20.1	53.1	2.9	33.8
⑨ 粉细砂	19.8	68.2	3.0	34.3

根据国家和地方规范,PHC 管桩场地各岩土层桩基础力学参数建议值如表 3 所示。

6.2.2 设计试桩

设计最初选择桩端后注浆钻孔灌注桩作为 F03

表 3 桩基础力学参数建议值

Table 3 Recommended values for mechanical parameters of pile foundation

土层名称	岩土状态	桩侧阻力 标准值 q_{sa}/kPa	桩端阻力 标准值 q_{pa}/kPa
① ₁ 填土	松散	—	—
① ₃ 黏质粉土	松散	15	—
② ₁ 粉质黏土	中密	15	—
③ 淤泥质粉质黏土	可塑	15	—
④ 淤泥质黏土	流塑	20	—
⑤ ₁ 粉质黏土	流塑~软塑	40~45	—
⑤ ₃₁ 粉质黏土	软塑为主	45~55	—
⑤ ₃₃ 粉质黏土	软塑为主	50~60	—
⑤ ₄ 粉质黏土	可塑~硬塑	55~65	—
⑦ ₂₁ 粉砂夹粉质黏土	中密~密实	90~100	5 500~6 500
⑦ ₂₂ 粉砂	密实	105~115	7 500~7 500
⑨ 粉细砂	密实	110~120	8 000~9 000

和 F06 塔楼的桩基,桩径为 700mm,试桩长度约 60m,有效桩长 50m,桩端持力层为⑨层粉细砂,采用大注浆量的桩端后注浆技术,注浆量为 3.5t/根。4 根试桩抗压极限承载力平均值为 10 150kN。

在专家支持下,进行了桩端后注浆 UHC 管桩作为两栋塔楼桩基的探索。桩端后注浆 UHC 管桩规格为 UHC600AB130,试桩长度为 47m,有效桩长约为 36m,桩端持力层为⑦₂₁ 粉砂夹粉质黏土。试桩采用静压沉桩工艺施工,沉桩按照桩长控制,终压力 3 690~5 670kN,变化幅度很大,反映场地地质条件变化剧烈。注浆采用注浆量控制,注浆量为 1.5t/根。注浆水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,水灰比为 0.55。

6.2.3 试桩结果

4 根设计试桩的静载试验结果如表 4 和图 3 所示。除 SZH8-36 这根试桩因为桩身缺陷,加载至 7 395kN 时破坏外,其余 3 根试桩加载至 8 700kN 时,都没有达到承载力极限状态,卸载后回弹率超过 50%,说明试桩还有很大的承载潜力。试桩结果表明,桩端后注浆管桩承载力较根据地勘报告估算的普通管桩抗压承载力提高 66% 以上,桩端后注浆对管桩承载力提升效果显著。

表 4 设计试桩静载试验检测结果

Table 4 Static load test detection results of design test pile

桩号	最大试验 荷载/kN	最大沉 降量/mm	回弹率/ %	承载力 极限值/kN
SZH8-29	8 700	39.62	65.67	≥8 700
SZH8-31	8 700	42.80	60.12	≥8 700
SZH8-34	8 700	30.59	54.32	≥8 700
SZH8-36	7 395	111.91	—	6 960

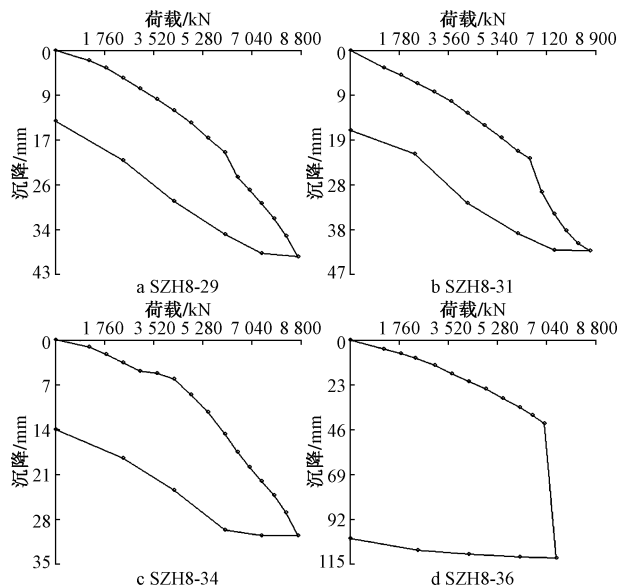


图3 设计试桩静载曲线

Fig. 3 Static load curve of design test pile

6.2.4 实施情况

根据试桩结果并经过专家论证,设计最终采用桩端后注浆 PHC600AB130 管桩作为 F03 和 F06 塔楼的桩基,单桩抗压承载力特征值取 3 570kN,较根据地勘报告计算值提高 45%。考虑到正常试桩在 8 700kN 荷载作用下未发生破坏,且卸载回弹率超过 50%,因此桩端后注浆 PHC600AB130 管桩作为塔楼桩基,具有很高的安全储备。

在参建各方共同努力下,2021 年 12 月 18 日—2022 年 1 月 25 日顺利完成 354 根桩端后注浆 PHC 管桩施工,施工工效达到 8 根/台班。

6.2.5 验收检测

2022 年 3 月 4 日,上海西岸金融城 F 地块桩端后注浆管桩顺利通过静载检测。静载检测采用慢速维持荷载法,检测结果如表 5 所示。6 根验收检测试桩在 7 200kN 验收荷载作用下,总沉降量在 20mm 左右,桩端后注浆管桩沉降性能优异。检测结果表明,桩端后注浆管桩承载力满足设计要求的承载力特征值 3 570kN,且具有较大的富余量。

表 5 静载试验检测结果

Table 5 Static load test results

桩号	最大试验荷载/kN	最大沉降量/mm	卸载后回弹率/%	单桩竖向抗压承载力检测值/kN
F06 西塔 4 号	7 200	17.56	55.41	≥7 200
F06 西塔 103 号	7 200	22.44	55.39	≥7 200
F06 西塔 121 号	7 200	19.57	54.01	≥7 200
F03-1 号楼 81 号	7 200	19.55	53.71	≥7 200
F03-1 号楼 124 号	7 200	18.21	53.21	≥7 200
F03-1 号楼 14 号	7 200	20.03	56.12	≥7 200

6.2.6 效益分析

F03 和 F06 塔楼桩基由原来的 265 根有效桩长 50m 的 $\phi 700$ 钻孔灌注桩,优化为 354 根有效桩长 35m 的 PHC600AB130 管桩,节约成本 338 万元,降本 40%,减少泥浆排放约 18 000m³。

7 结语

1) 桩端后注浆 PHC 管桩承载性能优良。设计试桩获得的最大单桩抗压承载力极限值不小于 8 700kN,比根据地勘报告估算的普通 PHC 管桩单桩抗压承载力高 66%,说明桩端后注浆对于提高 PHC 管桩的抗压承载力效果非常显著。

2) 桩端后注浆 PHC 管桩施工质量可靠。管桩工厂加工制作,质量容易保证和管控。只要管控好注浆桩尖加工制作、注浆管安装和注浆,桩端后注浆 PHC 管桩的施工质量就有保证。设计试桩和工程应用表明,桩端后注浆 PHC 管桩施工质量可靠。

3) 桩端后注浆 PHC 管桩成本优势明显。桩端后注浆 PHC 管桩施工工艺简单、施工设备简易,因此施工成本比较低。另外由于桩端后注浆 PHC 管桩承载性能优良,因此其单位承载力的造价较普通钻孔灌注桩低,成本优势非常明显。

4) 桩端后注浆 PHC 管桩工期优势明显。上海地区 60m 长、700mm 直径的钻孔灌注桩施工需要 8h,1 个台班只能施工 1.5 根钻孔灌注桩。而 47m 长、600mm 直径的桩端后注浆 PHC 管桩施工只需 1.5h,1 个台班 1d 可以施工 8 根桩端后注浆管桩,工期优势明显。

5) 桩端后注浆 PHC 管桩环境效益明显。上海西岸金融城 F 地块两栋塔楼如果采用钻孔灌注桩作为桩基,施工过程中将产生约 18 000m³ 的泥浆,环境影响很大。采用桩端后注浆 PHC 管桩作为桩基,完全避免了泥浆产生,环境效益明显。

当然,作为一项创新技术,桩端后注浆 PHC 管桩技术还有待完善,现场试验和基础理论有待加强,需要深入研究其承载机理和承载力计算方法,为推广应用创造良好条件。

参考文献:

[1] 孔清华,吴才德,李锋利,等. 桩底注浆高承载力预应力砼管桩研究与实践[J]. 岩土工程界,2006,9(11):43-45.
KONG Q H, WU C D, LI F L, et al. Research and practice of high bearing capacity PHC pile with pile bottom grouting [J]. Geotechnical engineering world, 2006,9(11):43-45.

[2] 宗可锋,李永峰,于国帅,等. 预应力混凝土管桩桩端压力注浆施工技术研究[J]. 建设科技,2015(13):106-107.
ZONG K F, LI Y F, YU G S, et al. Research on construction technology of pressure grouting at pile end of PHC pile [J]. Construction science and technology, 2015(13):106-107.

- [3] 米春荣, 李建明. 预应力混凝土管桩后注浆器的研制与应用 [J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(4): 89-95, 102.
MI C R, LI J M. Development and application of post grouting device for PHC pile [J]. Journal of Shandong University (engineering edition), 2016, 46(4): 89-95, 102.
- [4] 陈飞, 金建敏, 柯小环, 等. 基于物联网技术的静压法预应力管桩施工全过程监控系统应用研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(22): 82-86, 136.
CHEN F, JIN J M, KE X H, et al. Application research on the whole process monitoring system of static pressure prestressed pipe pile construction based on internet of things technology [J]. Construction technology, 2023, 52(22): 82-86, 136.
- [5] 杨德欢, 黄小娟, 刘俊斌, 等. 预应力混凝土管桩桩端桩侧联合后注浆模型试验研究[J]. 科技资讯, 2012(28): 39.
YANG D H, HUANG X J, LIU J B. Experimental study on post-grouting model of prestressed concrete pipe pile end-pile side combined with post-grouting model [J]. Science & technology information, 2012(28): 39.
- [6] 王光新, 傅志华, 刘将卿. 低净空大吨位后注浆静压钢管桩施工技术[J]. 安装, 2023(10): 99-101.
WANG G X, FU Z H, LIU J Q. Construction technology of low clearance and large tonnage post grouting static pressure steel pipe pile [J]. Installation, 2023(10): 99-101.
- [7] 吴坚荣, 黄嘉琪, 黄凯华, 等. 灌注桩后注浆对承载力的影响及经济性分析[J]. 建筑施工, 2023, 45(3): 573-575.
WU J R, HUANG J Q, HUANG K H, et al. The influence of post grouting of cast-in-place pile on bearing capacity and economic analysis [J]. Building construction, 2023, 45(3): 573-575.
- [8] 吴建龙. 预应力混凝土管桩后注浆技术研究[J]. 河南城建学院学报, 2022, 31(3): 50-54.
WU J L. Research on post grouting technology of prestressed concrete pipe pile [J]. Journal of Henan Urban Construction College, 2022, 31(3): 50-54.
- [9] 王彬, 郭昭胜, 贺武斌, 等. 界面状态对PHC管桩填芯抗拔承载性能影响试验研究 [J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(19): 103-108.
WANG B, GUO Z S, HE W B, et al. Experimental study on influence of interface state on pull-out bearing capacity of PHC pipe piles [J]. Construction technology, 2023, 52(19): 103-108.
- [10] 李伟, 张楷, 郭超溢, 等. 后注浆钢管桩桩-土界面力学特性及微观结构[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(19): 8159-8165.
LI W, ZHANG K, GUO C Y, et al. Mechanical properties and microstructure of post-grouting steel pipe pile-soil interface [J]. Science technology and engineering, 2021, 21(19): 8159-8165.
- [11] 刘春林, 唐孟雄, 胡贺松, 等. PHC管桩竖向抗压承载性状高应变法和静载法对比研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(14): 136-140.
LIU C L, TANG M X, HE H S, et al. Comparative study on vertical compressive bearing behavior of PHC pipe pile by high strain method and static load method [J]. Building structure, 2022, 52(14): 136-140.